

基于FFT简析三相SPWM信号相序检测要点

陈垚至

四川职业技术学院 四川遂宁 629000

摘要: 随着电力电子技术的快速发展,三相正弦脉宽调制(SPWM)信号广泛应用于变频器和电动机驱动系统中。三相电力系统中的相序检测是确保设备可靠运行的重要环节。传统的相序检测方法多依赖于硬件实现,存在一定的局限性。因此,本文基于快速傅里叶变换(FFT)技术,对三相SPWM信号的相序检测方法进行分析。通过对采集信号进行FFT频谱分析,能够有效识别各相信号之间的相位关系,从而快速判断相序的正确性。文中详细探讨了数据采集、频谱分析的具体步骤及相序判断的依据,并通过实验数据验证了所提出方法的准确性和实用性。本研究为三相系统的相序检测提供了一种高效新颖的解决方案,推动了数字信号处理技术在电力电子应用中的发展。

关键词: 三相SPWM信号;相序检测;快速傅里叶变换(FFT);频谱分析;电力电子

随着电力电子技术的发展,三相正弦脉宽调制(SPWM)信号在变频器、逆变器和电动机驱动等领域的应用愈发广泛。SPWM技术通过将直流电压调制为近似正弦波形,能够有效提高电能使用效率和控制精度,因而在现代电力系统中发挥着至关重要的作用。然而,在实际应用中,三相电力系统中的相序错误可能导致设备运行异常,甚至引发严重的设备损坏。传统的相序检测方法通常依赖于硬件电路实现,尽管这些方法在实时性和稳定性方面表现良好,但在复杂环境中容易受到噪声干扰,导致检测准确性降低。快速傅里叶变换(FFT)作为一种高效的数字信号处理技术,凭借其快速的计算能力和清晰的频域分析能力,成为三相SPWM信号相序检测的优秀工具。通过将时域信号转化为频域信号,FFT方法可以有效揭示各相之间的相位关系,并通过频谱信息快速判别相序是否正确。

一、三相SPWM信号概述

(一) SPWM信号的基本原理

脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)是一种调制技术,其主要原理是通过改变脉冲的宽度来控制信号的平均电压。在SPWM(正弦脉宽调制)中,输入的直流电压被调制为近似正弦波的输出信号。具体来说,SPWM通过与高频三角波进行比较,确定输出脉冲的宽度,进而获得不同的电压值。在一个周期内,脉冲宽度的变化产生了正弦波的形状,从而实现对电机或其他负载的精确控制。该技术广泛应用于逆变器和变频器中,以实现高效的交流电输出。

在三相系统中,SPWM信号的生成机制通常涉及对三相电压信号的调制。三相正弦波信号由三条相位相隔120度的正弦波构成,分别为A相、B相和C相。通过对这三路信号进行脉宽调制,可以控制每个相位的输出电压和相位角。为了实现三相SPWM信号的生成,首先生成三角波信号作为载波信号,然后将各相的正弦波信号与三角波信号进行比较,得到相应的调制信号,进而形成三相输出信号。这样的生成机制确保了各相之间的相位关系保持一致且稳定,为驱动三相电动机提供可靠的电力。

(二) 三相信号特性

三相信号的特性主要体现在其幅度、频率和相位之间的关系。理想的三相信号在幅度上应相等,频率一致,且在相位上相隔120度。具体而言,当A相为最大值时,B相和C相的输出分别落在其最大值的1/3和2/3周期的位置。这样的相位关系使得三相系统在时间上实现均匀的电力输出,有效降低了系统的谐波失真,并提高了能量的使用效率。此外,三相信号的幅度和频率是电动机正常运行的关键参数,若其未能保持稳定,则可能导致设备性能下降或故障。

SPWM信号的频谱特征主要表现在其频率组成和调制效果上,通过傅里叶变换,可以分析出SPWM信号的频谱,发现其频谱上除了基本的调制频率成分外,还包含一系列谐波成分。因为SPWM信号是通过调制三角波与正弦波生成的,其频率成分含有基波(即输出正弦波的频率)及多个奇次谐波(如3倍频、5倍频等)。谐波

的产生是由于PWM调制方法的非线性特点，虽然在一定程度上增加了频谱复杂性，但通过适当的滤波和调节可以有效减小谐波对系统性能的影响，从而保持较高的电能质量。因此，了解SPWM信号的频谱特征有助于优化电力系统的设计与调试，确保其稳定运行。

二、FFT（快速傅里叶变换）基础

（一）FFT的基本原理

傅里叶变换是信号处理和系统分析中的一种重要工具，它将一个时域信号转换为频域信号，以揭示信号在不同频率成分上的强度和相位信息。通过傅里叶变换，可以将复杂的时域信号分解成各个频率的正弦波叠加，从而使我们能够更清晰地观察信号的频谱特征。在应用中，傅里叶变换不仅帮助我们理解信号的频谱，也为滤波、谱分析、调制解调等信号处理技术提供了理论基础。

快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT）是傅里叶变换的一种高效计算方法，它通过分治策略显著减少了计算复杂度，使得原本耗时的傅里叶变换过程得以加速。传统的离散傅里叶变换（DFT）算法的计算复杂度为 $O(N^2)$ ，而FFT算法则将其降低到 $O(N \log N)$ 。这种效率提升使得FFT广泛应用于实时信号处理、音频分析、图像处理等领域。同时，FFT算法保持了数学上的准确性，因此在需要对信号进行频域分析时，FFT成为首选工具。

（二）FFT在信号分析中的应用

频域分析是信号处理中一种不可或缺的重要方法，通过将信号从时域转换到频域，我们能够深入洞察信号的频谱特性及其组成成分。这种分析方法不仅揭示了信号的整体特征，还提供了关于其内部结构的详细信息。借助快速傅里叶变换（FFT），我们能够对采集到的时域信号进行高效变换，获取其频谱信息。这一过程的核心在于，它不仅帮助我们识别信号中存在的特定频率，还能够细致分析各频率成分的幅度和相位，从而提供更丰富的信号特征描述。频域分析的应用场景非常广泛。在音频信号处理领域，它被用于音高检测和乐器识别，使得音频信号的分类和处理更加高效；在电力系统监测中，频域分析帮助工程师进行谐波分析，从而优化电能质量；在通信系统中，该方法则是信号调制与解调的基础，保障了信息的可靠传输。

频谱图是信号频域特征的直观可视化表示，它详尽展示了信号在各个频率上的幅度和相位分布。当对时域信号应用快速傅里叶变换（FFT）以获得频域数据后，

将这些数据以频谱图形式展示能够极大地帮助工程师和研究人员直观理解信号的特点与行为。在频谱图中，横坐标通常表示频率（以赫兹为单位），而纵坐标则表示对应频率成分的幅度（通常以分贝或线性单位表示）。通过观察频谱图，工程师能够快速识别信号中占主导地位的频率成分，检测潜在的噪声及干扰信号，还可以分析信号的谐波分布特征。例如，频谱图可以揭示频率分量是否过多集中在某一频段，从而为后续的信号处理和优化提供必要的信息。此外，频谱分析对于故障诊断和性能提升等应用同样至关重要。通过频谱图，工程师能够监测设备的运行状态和性能变化，及时发现异常情况并进行纠正措施，确保系统的稳定与可靠

三、相序检测方法

（一）传统相序检测方法

传统相序检测方法主要依赖硬件电路以实现三相电源相序的判别，这类方法通常使用电流或电压传感器，以检测三相电流或电压的相位关系。相序继电器是一种常用的硬件设备，它通过比较三相信号的电压大小和相位来判断相序。其基本原理是当三相信号的相位关系满足特定条件时（如A相电压领先B相和C相），继电器触发，输出指示相序的状态。这种方法的优点在于具备较高的实时性和稳定性，但缺点是对电路设计要求较高，且硬件成本及维护复杂度相对较高。

与硬件实现相比，软件算法实现的相序检测方法灵活性更高，适用于数字控制系统。该方法利用数字信号处理技术，通过对采集到的信号进行分析，判断信号的相序。常用的算法包括零交叉点检测法和相位差计算法。通过获取三相信号的采样数据，利用电子计算机或者DSP（数字信号处理器）进行运算，计算出各相信号之间的相位差，进而判断相序。相对于硬件检测，软件算法实现具有更强的适应性和可扩展性，但实时性和抗干扰能力往往低于硬件实现。

（二）基于FFT的相序检测方法

基于FFT的相序检测方法首先需要三相信号进行数据采集，使用采样器对电压或电流信号进行周期性采样，获得离散的时域信号数据。随后，数据预处理阶段需对采集到的信号进行去噪、滤波和归一化处理，以消除外界干扰和测量误差，确保信号质量。这一步骤的有效性直接影响FFT变换结果的准确性。从而，预处理过程至关重要，通常会依据所需频率特性选择相应的滤波器，确保所处理信号平滑，符合FFT算法分析要求。

表1 时域信号数据频谱分析数据表

序号	采样时间 (ms)	采样点	A相幅值 (V)	B相幅值 (V)	C相幅值 (V)	A相频率 (Hz)	B相频率 (Hz)	C相频率 (Hz)	A相相位 (°)	B相相位 (°)	C相相位 (°)
1	0.001	1	10.2	10.1	9.9	50	50	50	0	120	240
2	0.002	2	10.5	10.2	10.0	50	50	50	5	125	245
3	0.003	3	10.1	10.0	9.8	50	50	50	-2	118	238
4	0.004	4	10.3	10.4	10.1	50	50	50	1	121	241
5	0.005	5	10.4	10.3	10.2	50	50	50	0	120	240

在数据采集和预处理后，基于FFT的相序检测进入频谱分析阶段。通过对预处理后的信号应用快速傅里叶变换，获得其频谱特征。根据频谱图，可以识别出信号的主要频率成分及其幅值信息。接下来，通过分析各相信号在频域上的表现，可以计算出不同相之间的相位差。这些相位差信息作为相序判断的重要依据，能够准确、快速地判定三相电源的相序关系。FFT方法的高效性和准确性使其在复杂环境下依旧能保证相序检测的有效性。

(三) 相序判断依据

相序判断依据主要是分析不同相信号之间的相位关系，在三相系统中，理想情况下，A相、B相与C相之间相位差应为120度。采用基于FFT的分析方法后，需以所获得的相位差信息对相序进行判断。例如，若计算得A相相对于B相的相位差为+120度，而B相相对于C相相位差为+120度，则可确定为正确的相序；反之，则说明存在相序反转或不一致的情况。因此，建立明确的判断条件和标准是确保相序检测准确性的重要环节。

在相序检测过程中，误差的来源可能影响最终判断结果，常见的误差包括测量误差、信号噪声以及算法误差等。进行误差分析时，需要着重考虑每个环节的影响因素。针对采样过程中的信号失真和环境干扰，可以采取信号平滑和滤波技术以提升数据质量。同时，在算法实现中，也需要通过选择合适的FFT窗口函数，优化频谱分析参数来减少计算误差。此外，实施合理的后处理算法，如模糊逻辑控制，以进一步消除因误判导致的错误相序检测。因此，全面的误差分析及优化处理方案将提高相序检测方法的准确性和可靠性。

结束语

本研究探讨了基于快速傅里叶变换(FFT)技术的

三相SPWM信号相序检测方法，涵盖了数据采集、频谱分析和相序判断等关键环节。通过充分利用FFT在频域分析中的优势，实现了对三相信号相位关系的快速且高效的检测。这种方法不仅提高了相序检测的准确性，还为复杂电力环境下的信号处理提供了更大的灵活性。研究表明，基于FFT的相序检测方法在实时性与准确性方面具有显著优势，能够有效适应各种噪声条件及不确定性因素，为三相电力系统的安全稳定运行提供了强有力的支持。此外，软件实现的灵活性使其能够适应不断变化的实际应用需求，降低了硬件成本与维护复杂性。未来的研究可进一步深入探讨FFT技术与其他现代信号处理方法的结合，以提高相序检测的鲁棒性和适应性。同时，探索基于机器学习和人工智能技术的相序检测新方法，或许将为电力电子领域带来更新的发展机遇。

参考文献

- [1]徐艳玲, 艾学忠, 李思超, 等.基于FFT的三相SPWM信号相序检测方法[J].信息技术, 2022(008): 046.DOI: 10.13274/j.cnki.hdzt.2022.08.003.
- [2]于文斌, 黄昊, 陈文洁.三相光伏逆变改进型AZSPWM3算法研究[J].电力电子技术, 2016, 50(6): 3.DOI: 10.3969/j.issn.1000-100X.2016.06.008.
- [3]黄艺娜.基于频谱分析和改进BP网络的UPS系统三相SPWM逆变电路故障诊断研究[J].九江学院学报:自然科学版, 2022, 37(4): 41-45.
- [4]倪铎, 赵廉.三相SPWM混合调制Boost集成式光伏逆变器研究[J].应用能源技术, 2022(003): 000.
- [5]邓松彬, 杨兆华.基于三相并网逆变器SPWM及SVPWM控制的仿真研究[J].微计算机信息, 2022(007): 000.